

# 高过载永磁同步电动机设计研究\*

初振奎, 朱龙飞, 韩雪岩

(沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 永磁同步电动机(PMSM)的过载能力受到铁心饱和、电枢反应的制约,常规设计 PMSM 无法满足一些高过载应用场合的需求。分析 PMSM 过载能力的影响因素,研究定子裂比和气隙长度等结构参数对其影响方式,进而分析得出相关结构参数对于 PMSM 过载能力的影响规律。设计了 1 台额定功率 1 kW 的高过载能力 PMSM,有限元仿真结果显示该电机可达到 5.26 倍过载能力。

**关键词:** 永磁同步电动机; 高过载能力; 结构参数

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)02-0072-05

## Design and Research of High Overload Permanent Magnet Synchronous Motor\*

CHU Zhenkui, ZHU Longfei, HAN Xueyan

(National Engineering Research Center for REPM Machine, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** The overload capability of permanent magnet synchronous motor (PMSM) was restricted by core saturation and armature reaction. Conventional design of PMSM could not meet the requirements of some high overload applications. The influencing factors of the overload capacity of PMSM were analyzed. The influences of structural parameters such as stator crack ratio, permanent magnet thickness and air gap length were studied. The influence rules of relevant structural parameters on the overload capacity of PMSM were analyzed. A high overload capacity PMSM with rated power of 1 kW was designed. The finite element simulation results showed that this motor could achieve 5.26 times overload capability.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); high overload; structural parameters

## 0 引言

随着机器人、航空航天、电动汽车、军事等领域的快速发展,人们对于电动机过载能力的要求越来越高。电动机的高过载能力、高可靠性、轻量化成为比较热门的研究方向,常规设计的电机已无法满足使用需求。过载能力是衡量机器人用永磁电机性能好坏的重要参数,用过载倍数来表示。过载倍数是最大转矩倍数与额定转矩倍数的比值,可表示为  $K_m = T_{\text{emax}}/T_n$ 。

提高永磁同步电动机(PMSM)的过载能力,需要合理设计空载反电势和交、直流电抗。其中空载反电势受到绕组类型和匝数、电机频率、气隙磁通等因素的影响;交、直流电抗受到电机频率、线圈匝数、磁路磁阻等因素的影响<sup>[1]</sup>。由于永磁电机的气隙磁通主要由永磁体产生,永磁体的安装位置和尺寸大小对气隙磁通和磁路磁导起决定性作用<sup>[2]</sup>。不同转子磁路形式对磁路的磁导也有较强的影响,适当增加凸极率能够增大磁阻转矩、提高转矩密度<sup>[3]</sup>。绕组的类型、绕组直流电抗

\* 基金项目: 沈阳市科技计划项目(18-013-0-21);江西省重大研发专项项目(20173ABC28007)

作者简介: 初振奎(1992—),男,硕士研究生,研究方向为高速永磁同步电动机的设计分析。

朱龙飞(1988—),男,博士,研究方向为特种电机及其控制。

韩雪岩(1978—),女,教授,博士生导师,研究方向为特种电机及其控制。

和绕组因数对过载能力有直接影响,反映到电磁负荷上,则电负荷和磁负荷会共同决定电机的转矩输出能力和过载能力。

国内外学者对于 PMSM 过载能力提升措施进行了大量研究。文献[4]设计了 1 台工业机器人用永磁伺服电动机,在满足其他性能的前提下,通过增加永磁体厚度和气隙长度来提高 PMSM 的过载能力。文献[5]在考虑极限热负荷的情况下,研究结构参数和绕组直流电阻对永磁电机的极限输入电流的影响,分析了一些电磁参数的选取,最后提出一种高过载永磁电机的设计方法并通过试验验证。文献[6]提出两种提高交流主轴伺服电动机过载能力的方法:第一种方法是在磁密相同的条件下,通过对比不同转子槽数,计算出电机最大转矩倍数,以此分析其过载能力的大小;另一种方法是在定、转子槽数相同的条件下,通过对比不同磁密,计算出电机最大转矩倍数,由此分析其过载能力的大小。文献[7]从电机原理和结构两个方面入手,分析整数槽和分数槽、极槽配合以及齿槽面积比例对电机过载能力的影响,研究磁钢尺寸和极对数对永磁电机极限输出能力的影响,同时还分析了 PMSM 的极限输出功率与极限输入电流的关系,解决了如何提高电机的极限输入电流以提高电机过载能力的问题。文献[8]采用一种新型烧结永磁体材料,其有更高的形状设计自由度,使 PMSM 可以获得较高的抗去磁能力,试验证明采用这种改变磁化方向的扁平永磁体可增加 PMSM 的过载能力。文献[9]利用有限元法分析了极槽配合对气隙磁密、齿槽转矩和效率的影响,给出了低速大转矩永磁电机选择极槽配合和设计电机结构的原则。

基于现有文献研究内容,本文分析永磁伺服电机输出转矩的影响因素,研究各影响因素与电机结构参数的对应关系,进而得出电机结构参数对永磁电机过载能力的影响规律。在此基础上设计了 1 台具有高过载能力的 PMSM,利用有限元法对其转矩输出性能进行分析,验证了本文总结的规律的正确性。

### 1 永磁电机电磁转矩分析

电动机稳定运行于同步转速时,根据双反应理论可写出 PMSM 的电压方程为

$$\begin{aligned} \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 + j\dot{I}_d X_{ad} + j\dot{I}_q X_{aq} = \\ \dot{E}_0 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\dot{U}$ ——端电压;

$\dot{E}_0$ ——空载反电动势;

$R_1$ ——相直流电阻;

$\dot{I}_d, \dot{I}_q$ ——直轴、交轴电流;

$\dot{I}_1$ ——相电流;

$X_1, X_d, X_q$ ——漏电抗、直轴电抗和交轴电抗;

$X_{ad}, X_{aq}$ ——直轴、交轴电枢反应电抗。

由电压方程可画出  $\cos \varphi = 1$  控制模式下的 PMSM 的相量图,如图 1 所示。

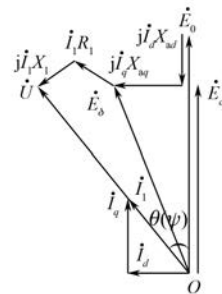


图 1  $\cos \varphi = 1$  控制时永磁同步电动机相量图

由图 1 可得如下关系:

$$\psi = \arctan \frac{I_d}{I_q} \quad (2)$$

$$\varphi = \theta - \psi \quad (3)$$

$$U \sin \theta = I_q X_q + I_d R_1 \quad (4)$$

$$U \cos \theta = E_0 - I_d X_d + I_q R_1 \quad (5)$$

式中:  $\varphi$ —— $\dot{U}$  与  $\dot{I}$  的夹角;

$\theta$ —— $\dot{U}$  超前  $\dot{E}_0$  的夹角;

$\psi$ —— $\dot{I}$  与  $\dot{E}_0$  间的夹角。

从式(4)和式(5)中可求出电动机定子电流的直、交轴分量:

$$I_d = \frac{R_1 U \sin \theta + X_q (E_0 - U \cos \theta)}{R_1^2 + X_d X_q} \quad (6)$$

$$I_q = \frac{X_d U \sin \theta - R_1 (E_0 - U \cos \theta)}{R_1^2 + X_d X_q} \quad (7)$$

定子相电流:

$$I_1 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (8)$$

电机的输入功率:

$$\begin{aligned} P_1 = m U I_1 \cos \varphi = m U I_1 \cos (\theta - \psi) = \\ m U (I_d \sin \theta + I_q \cos \theta) = \end{aligned}$$

$$mU \frac{\left[ \begin{matrix} E_0(X_q \sin \theta - R_1 \cos \theta) + \\ R_1 U + \frac{1}{2} U(X_d - X_q) \sin 2\theta \end{matrix} \right]}{R_1^2 + X_d X_q} \quad (9)$$

忽略定子电阻,由式(9)可得电动机的电磁功率为

$$P_{em} \approx P_1 \approx \frac{mE_0 U}{\omega X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \quad (10)$$

除以电机的机械角速度  $\Omega$ , 可得到电动机的电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{mpE_0 U}{\omega X_d} \sin \theta + \frac{mpU^2}{2\omega} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta \quad (11)$$

令  $A = mp/(\omega X_d)$ ,  $K = 0.5(1 - X_d/X_q)$ , 则  $T_{em}$  对  $\theta$  求导可得:

$$\frac{dT_{em}}{d\theta} = AUE_0 \cos \theta - 2KAU^2 \cos 2\theta \quad (12)$$

$$\frac{d^2 T_{em}}{d\theta^2} = AU \sin \theta (8KU \cos \theta - E_0) \quad (13)$$

其中, 当  $\frac{d^2 T_{em}}{d\theta^2} \leq 0$  时,  $T_{em}$  有极大值。

$$\text{令 } \frac{dT_{em}}{d\theta} = 0, \text{ 则 } \cos \theta = \frac{1 - \sqrt{32K^2 + 1}}{8K} \text{ 时,}$$

$$T_{emax} = AU \sin \theta (E_0 - 2KU \cos \theta) =$$

$$AU \sqrt{1 - \cos^2 \theta} (E_0 - 2KU \cos \theta) =$$

$$\frac{A}{32K} \sqrt{32K^2 U^2 + 2E_0 \sqrt{E_0^2 + 32KU^2} - 2E_0^2} \times$$

$$(3E_0 + \sqrt{E_0^2 + 32KU^2}) \quad (14)$$

由式(14)可以看出,影响 PMSM 的过载能力的主要因素为空载反电动势和交直流电抗参数。为此,本文分别研究了定子裂比和气隙长度等参数对 PMSM 过载能力的影响规律。

## 2 PMSM 过载能力的研究与电机设计分析

### 2.1 定子裂比的影响

在一定的气隙长度下,定子裂比越大,永磁体有效面积越大,气隙磁密增加,可通过增加磁负荷

来提高电机的过载能力。定子裂比越小,定子的齿槽面积越大,齿槽面积增大后可通过增加电负荷来提高电机的过载能力。以 PMSM 为例,在保证反电动势基本不变的前提下,选取不同的定子裂比,分别对比定子齿轭磁密和交直流电感,结果如表 1 所示。随着定子裂比的增大,齿磁密升高,交直流电感减小。过载能力受齿轭磁密饱和的影响,定子裂比的选取是对电负荷和磁负荷的权衡选择,理论上存在能使过载能力最优的定子裂比值。通过仿真计算对比不同定子裂比的永磁电机的过载能力,结果如图 2 所示。

表 1 不同定子裂比的电机参数

定子裂比	齿磁密/T	轭磁密/T	每槽导体数	$L_d$ /mH	$L_q$ /mH
0.423	1.400 2	1.487 1	48	1.943	1.928
0.471	1.403 7	1.494 7	45	1.673	1.654
0.500	1.411 7	1.496 8	42	1.418	1.404
0.529	1.442 6	1.498 1	40	1.251	1.236
0.557	1.465 5	1.491 9	38	1.109	1.096

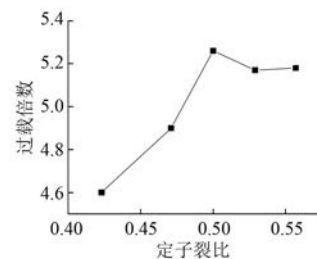


图 2 不同定子裂比永磁电机的过载倍数

由图 2 可以看出,随着定子裂比的增加,永磁电机整体过载能力呈增加趋势;当定子裂比为 0.5 时,PMSM 的过载倍数达到最大值。

### 2.2 气隙长度的影响

气隙长度的大小直接影响气隙磁密、电机反电动势以及电感参数,从而影响 PMSM 过载能力。随着气隙的改变,永磁体的厚度也会发生改变,永磁体的厚度影响电机的交直流电抗和气隙磁密。在保证气隙磁密基本不变的情况下,改变气隙长度和永磁体厚度,观察交直流电感的变化,结果如表 2 所示。

随着气隙长度的增加,永磁体用量增加,交直流电感减小。通过有限元分析,可得气隙长度与过载能力的关系曲线,如图3所示。

表2 不同气隙长度的电机参数

气隙长度/mm	永磁体厚度/mm	$B_{\delta}/T$	$L_d/mH$	$L_q/mH$
0.3	1.5	0.916 0	1.725 0	1.586 0
0.4	2.2	0.917 4	1.569 0	1.471 0
0.5	3.0	0.910 0	1.418 0	1.404 0
0.6	4.2	0.910 0	1.415 3	1.481 2
0.7	6.0	0.908 4	1.307 0	1.306 0

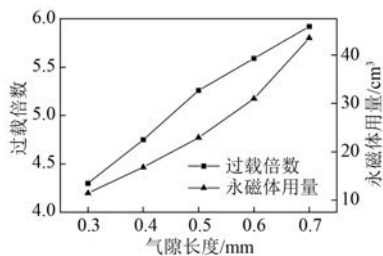


图3 不同气隙长度 PMSM 的过载倍数和永磁体用量

由图3可以看出,随着气隙长度的增加,电机过载能力逐渐增强。分析原因是因为气隙长度增大,电机磁路磁阻随之增大,绕组电感减小,电枢反应强度减弱,从而提高永磁电动机的过载能力。但随着气隙长度的增加,永磁体的用量也在增长,在电机成本允许的情况下增加气隙长度有助于提升电机的过载能力。

### 3 高过载 PMSM 设计与仿真

本文以机器人用高过载永磁伺服电机为研究对象,基于前文分析的相关结构参数对永磁电机过载能力的影响规律,设计了1台额定功率为1 kW的高过载 PMSM。电机设计参数如表3所示。由行业内主流伺服电机样本可知,目前同功率等级的永磁伺服电机过载倍数为3~3.5倍<sup>[10-11]</sup>。

利用有限元软件对电机进行仿真,电机结构及磁场分布如图4所示。然后对电机的过载能力进行分析。通过改变输入电流,观察输出转矩。利用 Maxwell 软件对输入电流进行参数化处理,分别输入1~10倍额定电流,计算输出转矩。结果如图5所示。把所得结果进一步处理得到输入电流倍数与过载倍数关系曲线,如图6所示。

表3 1 kW PMSM 的设计方案

参数名称	参数值
功率/kW	1
频率/Hz	250
定子外径/mm	70
定子内径/mm	35
电机铁心长/mm	78
气隙长度/mm	0.5
槽数	12
每槽导体数	42
额定转矩/(N·m)	3.18
永磁体宽度/mm	9.8
永磁体厚度/mm	3
电密/(A·mm <sup>-2</sup> )	7.47
反电动势/V	95.6
空载气隙磁密/T	0.911
最大转矩/(N·m)	21.42

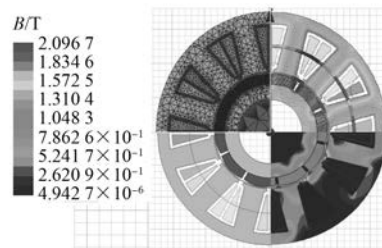


图4 电机空载下剖面图及电磁场图

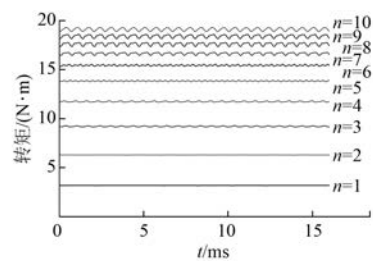


图5 不同倍数电流下的转矩分布

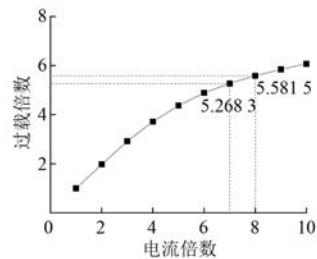


图6 输入电流倍数与过载倍数关系曲线

由图 6 可知,当输入电流为额定电流的 7~8 倍时,过载倍数变化不大,过载能力趋于饱和。电机的最大过载倍数为 5.26 倍。

#### 4 结 语

本文分析了影响永磁电机过载能力的因素,研究了定子裂比和气隙长度对 PMSM 过载能力的影响规律,设计了 1 台 1 kW 机器人用 PMSM,利用有限元法对其转矩输出性能进行了仿真分析。结果显示该电机可达到 5.26 倍过载能力,相比于同类型同功率永磁伺服电机产品,过载能力提升了 40% 以上。

#### 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 张飞,唐任远,陈丽香,等.永磁同步电机电抗参数研究[J].电工技术学报,2006,21(11):7.
- [ 2 ] TRUMPER D L, WILLIANMS M E, NGUYEN T H. Magnet arrays for synchronous machines [ C ] // IEEE IAS 28th Annual Meeting, 1993: 35.
- [ 3 ] UGALE R T, BHANUJI A, CHAUDHARI B N. A novel line start permanent magnet synchronous motor using two-part rotor [ C ] // TENCON 2009, 2009 IEEE Region 10 Conference, 2009.
- [ 4 ] 陈金炫.工业机器人用永磁同步交流伺服电动机设计 [ D ].广州:华南理工大学,2016.
- [ 5 ] 李立毅,张江鹏,赵国平,等.考虑极限热负荷下高过载永磁同步电机的研究 [ J ].中国电机工程学报,2016,36(3):845.
- [ 6 ] 石有生.提高交流主轴伺服电动机过载能力的方法 [ J ].电机技术,2015(5):33.
- [ 7 ] 李立毅,张江鹏,闫海媛,等.高过载永磁同步电机的电磁特性 [ J ].电工技术学报,2017,32(2):125.
- [ 8 ] AKUNE R, AKATSU K, FUJIHARA M, et al. Study of high torque density interior permanent magnet synchronous motor with flexible orientation Nd2Fe14B sintered magnet [ C ] // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016: 578.
- [ 9 ] SHI J, CHAI F, LI X, et al. Study of the number of slots/pole combinations for low speed high torque permanent magnet synchronous motors [ C ] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011.
- [ 10 ] 松下电器机电(中国)有限公司.A6 家族伺服电机 [ EB/OL ]. [https://device.panasonic.cn/ac/c/dl/manual/index.jsp?series\\_cd=3514](https://device.panasonic.cn/ac/c/dl/manual/index.jsp?series_cd=3514).
- [ 11 ] 苏州江川技术有限公司.MS1 系列伺服电机选型手册 [ EB/OL ]. [http://www.inovance.cn/content/details83\\_17430.html](http://www.inovance.cn/content/details83_17430.html).

收稿日期:2018-10-11

#### [ 期刊简介 ]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行人,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。